
Fundamentos e implicaciones del cambio climático. Una visión global

Fernando Gallardo Olmedo

Fernando Gallardo Olmedo es Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales. Desde 2012 es Profesor Contratado Doctor en la Facultad de Económicas de la Universidad Autónoma de Madrid y con anterioridad, desde 1990, fue Profesor Asociado en dicha Facultad. Entre 1984 y 1997 trabajó en Telefónica. En el periodo comprendido entre 1997 y 2012 trabajó como consultor en temas financieros, estrategia empresarial y modelado de sistemas.

Jaime Martínez Valderrama

Jaime Martínez Valderrama es Doctor Ingeniero Agrónomo. Desde 2006 está vinculado a la Estación Experimental de Zonas Áridas (CSIC). Su principal campo de investigación son los modelos de simulación dinámica aplicados al estudio de problemas medioambientales. Además ha sido consultor para diferentes entidades como ING, el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, o el CEIGRAM (UPM).

Miguel Buñuel González

Miguel Buñuel es Profesor de Economía Aplicada en UAM. Dr. en Economía y Licenciado en Derecho por UAM; Máster en Economía y Doctor en Estudios de Energía y Medio Ambiente por Boston University. Es Visiting Associate Professor en Stanford University en Madrid y ha sido docente en UCM, UNED, Boston y Harvard. Investiga en Economía ambiental y Economía pública. Ha sido Asesor del Ministerio de Medio Ambiente, Responsable de Estudios y Publicaciones de la Fundación Biodiversidad y ha llevado a cabo trabajos de investigación para la Comisión Europea, el Banco Mundial, el IEF y varios ministerios.

RESUMEN

La acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera como consecuencia de las actividades humanas está provocando un aumento de la temperatura en la atmósfera y en los océanos. Este proceso de cambio climático tiene consecuencias globalmente negativas desde una perspectiva social, económica y financiera. Este trabajo tiene como objetivo presentar una visión general del fenómeno del cambio climático, sus implicaciones económicas y las políticas más adecuadas para enfrentarse al problema. Para ello procederemos, en primer lugar, a una revisión de las evidencias empíricas y de las previsiones acerca del proceso de cambio climático. En segundo lugar, se analizará la evolución de las emisiones de CO₂ en el mundo. En tercer lugar se expondrá el concepto de coste social del carbono, el cual se utiliza para estimar el perjuicio económico provocado por las emisiones de CO₂. Finalmente se estudiarán las iniciativas internacionales y las políticas frente al cambio climático.

PALABRAS CLAVE

Cambio climático, gases de efecto invernadero, coste social del carbono, políticas de adaptación y políticas de mitigación.

ABSTRACT

Accumulation of greenhouse gases from human activities in the atmosphere is causing an increase of temperatures in the atmosphere and oceans. This process of climate change has negative global repercussions. This paper aims to introduce a general view of the climate change phenomenon, as well as its economic consequences and the most appropriate policies to be implemented in order to deal with the problem. We proceed, firstly, to review empiric evidences and forecast relating to the climate change process. Secondly, we analyze the worldwide evolution of CO₂ emissions. Thirdly we introduce the concept of social cost of carbon, which it is used in order to estimate the economic harm caused by those emissions. Finally, we study the international agreements and policies against climate change.

KEYWORDS

Climate change, greenhouse gases, social cost of carbon, adaptation policies and mitigation policies.

JEL

F53, F64, H23, Q01, Q40, Q54.

1. EVIDENCIAS Y PREVISIONES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Las consecuencias del cambio climático tienen una presencia casi diaria en los medios de comunicación. Así, por ejemplo, en el momento de redactar estas líneas, la prensa nos muestra un nuevo caso preocupante, como es el deshielo de la Antártida Oriental. En efecto, un equipo liderado por el glaciólogo británico Stewart Jamieson ha observado allí la formación de casi 8.000 lagos a partir de hielo derretido durante los veranos del periodo 2000-2013 (Langley et al., 2016). Nos acostumbramos con cierta pasividad al aspecto novedoso del tema: *“Es la primera vez que se detecta este fenómeno de los lagos azules en la Antártida Oriental, la mayor masa de hielo del planeta”* resalta el artículo (El País, 2016), donde se nos recuerda otro récord, al que también nos hemos habituado: *“El año 2015 fue el más cálido desde que empezaron los registros en 1880”*.

Actualmente hay un acuerdo generalizado acerca de que la actividad económica de la humanidad ha generado una dinámica de incremento de las temperaturas, tanto en la atmósfera como en los océanos, como consecuencia de la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI)¹ en la atmósfera. La actividad humana provoca el aumento de GEI en la atmósfera mediante dos formas: (i) a través de la emisión de gases hacia la atmósfera (quema de combustibles fósiles, actividades industriales y explotaciones ganaderas) y (ii) como consecuencia de la eliminación de sumideros naturales de CO₂, esencialmente a través de la tala de bosques, en especial los tropicales.

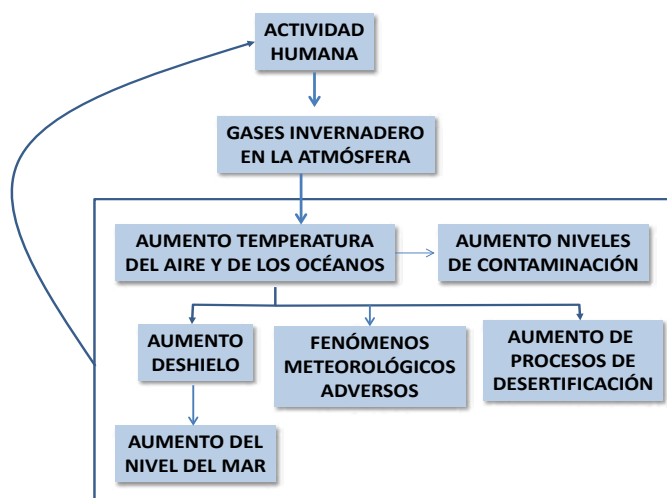
Los principales GEI generados por la actividad humana son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido de nitrógeno (NO₂) y los gases fluorados, tales como los hidrofluorocarbonos (HFC), el sulfuro hexafluorido (SF₆) y los perfluorocarbonos (PFC). Hay que tener presente que los ciclos propios de la naturaleza generan emisiones de GEI, tales como el vapor de agua y el dióxido de carbono, y en menor medida el metano y el óxido de nitrógeno. Una particularidad del vapor de agua es que el incremento de temperatura que genera la emisión del resto de gases contribuye a potenciar su efecto invernadero. Por lo tanto, se puede decir que la actividad económica, sobre todo por la emisión de carbono a la atmósfera, desestabiliza el funcionamiento natural de los GEI, provocando un incremento de temperaturas no deseable.

El aumento de las temperaturas en la superficie terrestre y en los océanos trae como consecuencia varios cambios en el ecosistema del planeta Tierra, tales como la disminución de las capas de hielo y el consiguiente aumento del nivel del mar, y el aumento de fenómenos meteorológicos adversos. Estos cambios afectan a la vida de las especies que habitan la Tierra y al sistema eco-

1 Se utiliza también la abreviatura GHG (*Greenhouse Gases*).

nómico, social y cultural de la humanidad. Dado que es la propia actividad humana la que está provocando el aumento de los GEI en la atmósfera, nos encontramos con un bucle de realimentación típico de la Dinámica de Sistemas² (ver Figura 1).

Figura 1. Bucle generado por la actividad humana sobre el clima



La avalancha de hechos que confirman el calentamiento de nuestro planeta, provocado por la actividad humana, y la acusada reiteración en los medios de comunicación transmite la poderosa idea de que el cambio climático es un problema relativamente reciente. Lejos de esta realidad, el fenómeno lleva varias décadas tratándose (Hernández, 2016), aunque no podemos negar la trascendencia y actualidad del problema.

El ingeniero británico Guy Stewart Callendar (1939) estableció, a finales de los años treinta, la teoría del cambio climático antropogénico debido al CO₂ tal y como la entendemos hoy, aunque el trabajo que se considera como pionero en el establecimiento de la conexión entre acumulación de CO₂ y el aumento de las temperaturas es el publicado por Manabe y Wetherald (1967).

Desde 1990, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) publica anualmente los aumentos de temperatura, las medidas de concentración de CO₂ en la atmósfera y las

2 Está metodología fue introducida por Forrester (1961) y tiene como objetivo plasmar en un modelo la lógica de un sistema a través de sus relaciones causales, prestando una especial atención a los bucles de realimentación causales y a los efectos retardados.

proyecciones que se estiman, así como los eventos meteorológicos extremos asociados a estos cambios. Establecido por primera vez en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el IPCC se ha convertido en la referencia pública del consenso científico sobre el cambio climático y sus efectos.

A pesar del cúmulo de evidencias y estudios (IPCC, 2007) que confirman y vuelven a confirmar el aumento de las temperaturas y la acumulación de gases con efecto invernadero, todavía quedan negacionistas, uno de cuyos últimos refugios era, precisamente, la Antártida. Allí, argüían, la cantidad de hielo que rodea al continente aumenta. La masiva aparición de lagunas en medio del continente, junto con un saldo negativo de la acumulación de hielo, nos vuelve a recordar que las evidencias son innegables y, como sugería Gore (2007), verdades ciertamente incómodas.

El problema del cambio climático no es una cuestión meramente ambiental o un capricho de los ecologistas que pretenden preservar ecosistemas en un estado más o menos original. Se trata de un asunto que afecta a la economía mundial, pues para su solución hay que rediseñar el modo en el que se produce la energía que sustenta el modelo productivo actual. Reconocer la cadena "Actividad humana - Emisión de gases - Aumento de las temperaturas - Daños a la economía" no resulta sencillo, puesto que obliga a cambios estructurales drásticos.

Sin embargo parece que hemos llegado a una situación en la que ya no podemos seguir mirando a otro lado. Reconocer el cambio climático es incómodo, pero sus consecuencias lo son mucho más. A continuación presentamos un resumen de los principales hechos que acreditan el cambio climático y sus consecuencias en el ecosistema. Posteriormente nos centraremos en las previsiones.

1.1. El Cambio Climático: hechos

A continuación se repasan los hitos más emblemáticos del cambio climático, sustentados por observaciones y datos estadísticos.

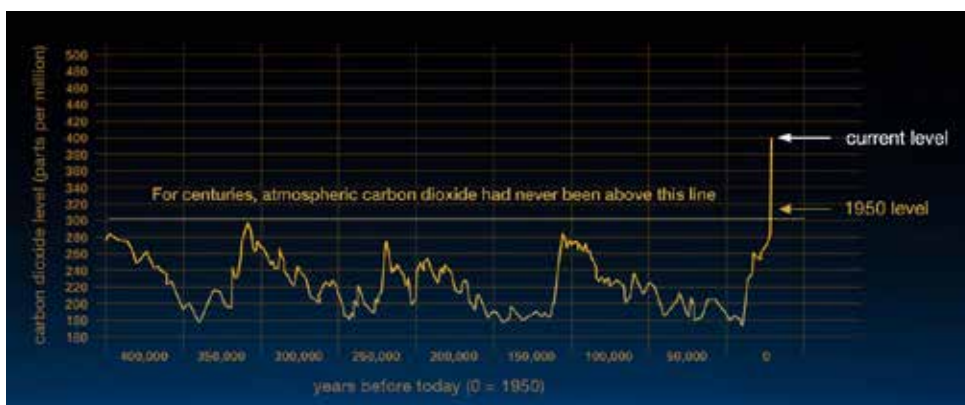
Acumulación de gases con efecto invernadero

El CO₂ es un gas de efecto invernadero producido principalmente por la actividad humana y es responsable del 63% del calentamiento global causado por la actividad económica. Su concentración en la atmósfera supera actualmente en un 40% el nivel registrado al comienzo de la industrialización (Comisión Europea, 2016). Otros gases de efecto invernadero se emiten en menores cantidades pero son mucho más eficaces que el CO₂ a la hora de retener el calor. El metano es responsable del 19% del calentamiento global de origen humano.

En las últimas décadas su aumento ha sido imparable, como consecuencia del cambio de modelo productivo de alimentos. La composición de la dieta tradicional, basada en cereales y legumbres, está siendo sustituida por el consumo de proteínas de origen animal. En consecuencia, el número de cabezas ganaderas ha aumentado exponencialmente y, con ello, las emisiones de metano.

El análisis realizado a partir de los núcleos de hielo ha permitido a los científicos estimar la concentración de CO₂ de la atmósfera de tiempos pasados (hasta 400.000 años). Esta trayectoria (ver Figura 2), muestra un hecho impactante: hemos sobrepasado el umbral de las 300 ppm (partes por millón)³ de CO₂ de manera irrefrenable.

Figura 2. Evolución de la concentración de CO₂ en ppm desde hace 400.000 años hasta el presente



Fuente: Figura tomada de NASA (<http://climate.nasa.gov/evidence/>), a partir de datos de Petit et al., 1997.

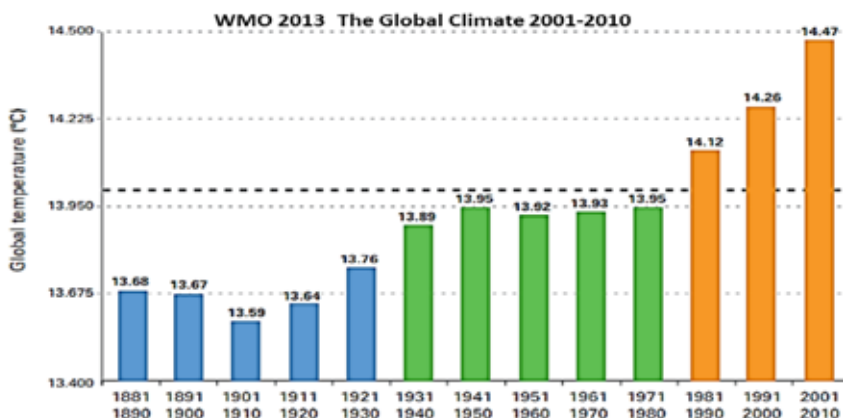
Aumento de las temperaturas

Las tres principales reconstrucciones de la temperatura de la superficie terrestre muestran que la Tierra se ha calentado (Osborn et al., 2014; BAMS, 2016; GISTEMP, 2016) desde 1880. La mayor parte de este calentamiento ocurrió desde la década de los 70 del pasado siglo. Los 20 años más cálidos jamás registrados han tenido lugar desde 1981 y los 10 más cálidos en los últimos doce años. A pesar de que en el año 2000 se registró un declive en la emisión solar que se tradujo en un mínimo solar acaecido en 2007-2009, la temperatura ha seguido

3 Esta es una unidad utilizada en física para medir la concentración.

su tendencia positiva. En la Figura 3 se muestra la evolución de la temperatura media por décadas desde 1880.

Figura 3. Evolución de las temperaturas por década desde 1881



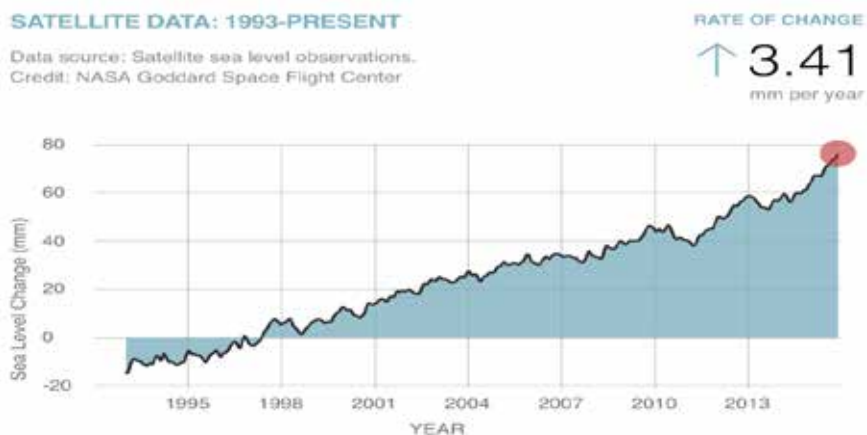
Fuente: Figura tomada de Climate Emergency Institute (2016). Disponible en: http://www.climateemergencyinstitute.com/uploads/WMO_2013_global_temp_increase_box.png.

Como es lógico, el calentamiento no se circunscribe al aire o la superficie terrestre. Las masas de agua del planeta también han aumentado su temperatura. Los océanos han actuado como sumideros de gran parte del calor almacenado en el sistema atmosférico. Se ha estimado que los 700 metros de agua más cercanos a la superficie han aumentado su temperatura media en 0,3°C desde 1969 (Levitus et al., 2009).

Subida del nivel del mar

La subida del nivel del mar está relacionada con dos hechos vinculados con el calentamiento global: el agua procedente del deshielo y la expansión del agua salada debido a su calentamiento. El siguiente gráfico muestra los cambios observados mediante satélite del nivel del mar desde 1993. El último registro, que data de mayo de este año, es de 87,4 mm (<http://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>).

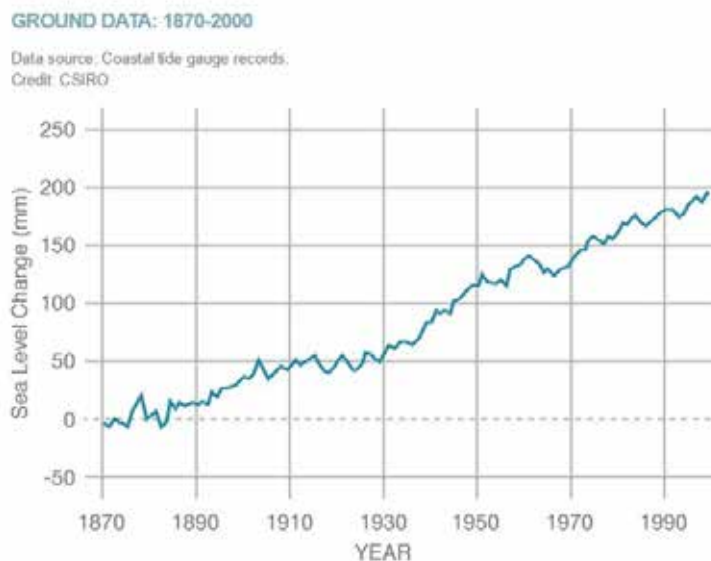
Figura 4. Cambios en el nivel del mar



Fuente: Satellite sea level observations, NASA Goddard Space Flight Center

Considerando una perspectiva temporal más amplia, diremos que el nivel medio del mar ha subido 17 centímetros en el último siglo. Esta progresión se ha duplicado en la última década. (Church y White, 2006). La Figura 5 muestra los cambios producidos entre 1870 y 2000.

Figura 5. Cambios en el nivel del mar

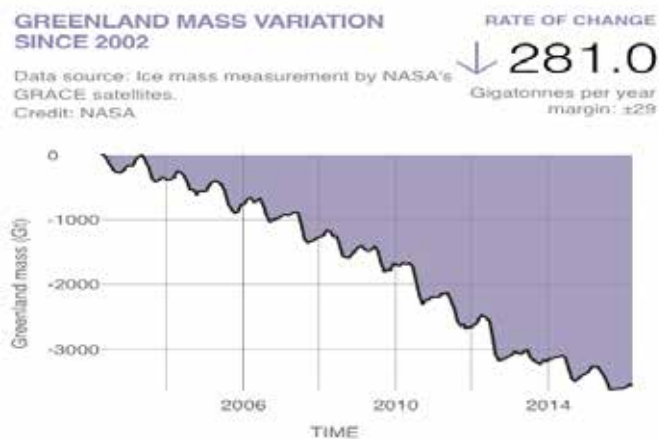


Fuente: Figura tomada de CSIRO Marine and Atmospheric Research.

Retracción de las masas de hielo

La consecuencia inmediata del aumento de las temperaturas es un retroceso de los diversos depósitos de hielo y nieve de la Tierra. Así, tanto las capas de hielo continentales más extensas del planeta, como son las de Groenlandia y la Antártida han menguado considerablemente. Según datos de la NASA, en el primer caso el ritmo de pérdida de hielo es de unas 281 Giga-toneladas anuales (ver figura 6), mientras que en la Antártida el balance negativo es de unas 117 Gtn/año.

Figura 6. Variación de la masa de hielo de Groenlandia



Fuente: Ice mass measurement by NASA's GRACE satellites (<http://climate.nasa.gov/vital-signs/land-ice/>).

Además, la extensión y grosor del hielo del mar Ártico ha declinado de manera muy rápida en las últimas décadas (Polyak et al., 2009). El panorama se completa con el repliegue de los glaciares en todas las montañas del mundo (National Snow and Ice Data Center) y con la disminución de la superficie cubierta por nieve durante el invierno en el hemisferio norte, como demuestran las imágenes por satélite (Derksen y Brown, 2012 y National Snow and Ice Data Center).

Aumento de los eventos extremos

Los eventos climáticos extremos, tales como olas de calor, inundaciones, huracanes, etc., están dejando de ser algo excepcional. El calentamiento global ha cambiado la frecuencia de las olas de calor, que han quintuplicado su frecuencia (Fischer y Knutti, 2015).

Multitud de incidencias de este tipo (tifones, inundaciones, sequías, etc.) se registran en todo el mundo cada vez con más asiduidad. Así, por ejemplo, el número de eventos con temperaturas altas se ha incrementado en Estados Unidos, así como los episodios de lluvias torrenciales⁴. En el sureste de Inglaterra se registraban temperaturas de 33.2 °C cada mil días; ahora lo hace cada 200 días (Mathiesen, 2015).

Acidificación del mar

Los océanos han absorbido alrededor del 30% del dióxido de carbono antropogénico emitido, incrementando su acidificación (Sabine et al., 2004). Esto repercute negativamente en la cantidad de fitoplancton, cuya contribución en la fijación de CO₂ se ve mermado, y en la supervivencia de los corales, que han desaparecido de una buena parte de los fondos oceánicos.

1.2. Previsiones en un sistema complejo

El clima es el resultado de la interacción de numerosos elementos. Muchos de los procesos que intervienen en un sistema tan complejo no se conocen con el suficiente detalle como para obtener predicciones con un grado de fiabilidad mínimamente aceptable. Estamos en un entorno de incertidumbre extremadamente elevado, dada la cantidad de interacciones de carácter no-lineal, retardos y bucles implicados en el clima de la Tierra; así como en la ausencia de experiencia pasada que permitan fundamentar, de alguna manera, las ecuaciones de los modelos.

Las evidencias paleoclimáticas sugieren que el clima tiende a cambiar de forma brusca, pasando de un estado de equilibrio a otro en poco tiempo. Así ha ocurrido en las transiciones entre los periodos glaciales e interglaciares. Estas alteraciones se han desencadenado por pequeñas variaciones en la distribución e intensidad de la radiación solar, que resultan amplificadas por diversos mecanismos de retroalimentación (FitzRoy y Papyrakis, 2016).

Estos mecanismos latentes pueden ser activados por motivos aparentemente inocuos y cambiar el panorama en muy poco tiempo. Son estos elementos los que otorgan complejidad al cambio climático y dan al traste con las predicciones que considerábamos más precisas. Así, por ejemplo, el IPCC pronosticó que el Ártico perdería todo su hielo al final del verano a finales de siglo, pero ahora las previsiones dicen que serán en una o dos décadas. El propio proceso de deshielo contiene un mecanismo acelerador, que consiste en el calentamiento adicional propiciado por la reducción del albedo, es decir, que la

4 Véase <http://www.ncdc.noaa.gov/extremes/cei/index.html>

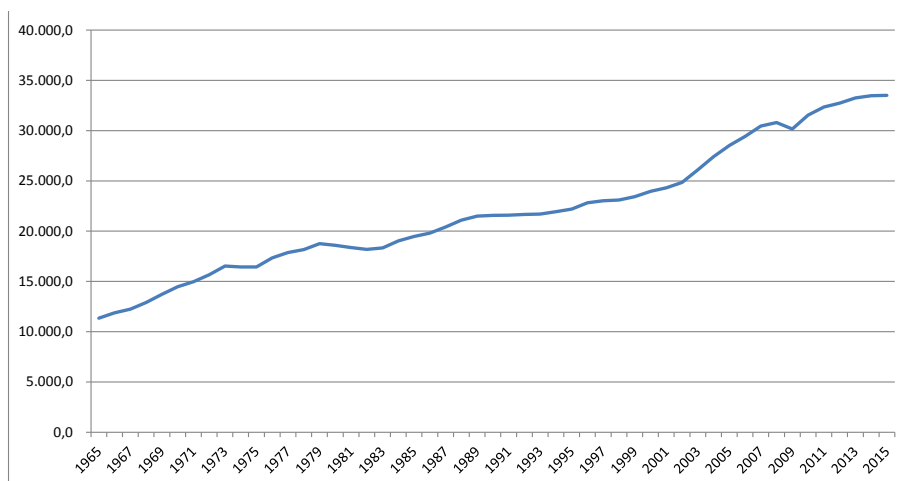
radiación solar se reflejará menos (será más absorbida) a medida que la superficie blanca (hielo y nieve) disminuya.

Otro caso que refleja bien la complejidad del problema y la dificultad que entrañan las predicciones es que se creía que la fusión de las capas de hielo de la Antártida y Groenlandia era un proceso lento, de arriba abajo, y que tardaría milenios en completarse. Ello, a su vez, retardaba las previsiones acerca de la subida del nivel del mar de acuerdo a los escenarios del IPCC. Sin embargo, registros geológicos y observaciones recientes hablan de cambios mucho más súbitos y alarmantes. Alguna de las razones que pueden justificar este nuevo punto de vista tiene que ver con procesos asociados y simultáneos que operan a otros niveles. La generación de grietas en la superficie permite el paso de agua hacia las capas profundas, lubricando el fondo rocoso y favoreciendo el deslizamiento de grandes masas de hielo hacia el mar, donde se derriten. Anunciando este proceso, uno de los científicos más relevantes en este campo hizo un llamamiento urgente para actuar con la mayor premura posible (Hansen, 2007).

El cambio climático actúa como el pistoletazo de salida de otros muchos procesos aparentemente inertes que pueden acelerar el calentamiento actual o incluso llevarlo hacia la dirección opuesta, es decir, hacia una nueva era glacial. La liberación de depósitos de metano y carbono que estaban 'cautivos' pueden echar por tierra las previsiones sobre el aumento de la temperatura. Actualmente la temperatura media es 0,85 °C superior a la de finales del siglo XIX. En lo que parece haber consenso es que un aumento de 2 °C con respecto a la temperatura de la era preindustrial es el límite más allá del cual existe un alto riesgo para que se desencadenen cambios peligrosos y catastróficos. Tomar las decisiones correctas en los próximos años es a la vez algo tan complicado como necesario.

2. PANORAMA INTERNACIONAL DE LAS EMISIONES DE CO₂

Las emisiones de CO₂ a la atmósfera han aumentado considerablemente a lo largo de los últimos 50 años. De acuerdo con datos de BP (2016), en el año 1965 se emitieron unos 11.500 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, mientras que en 2015 la cifra prácticamente se triplicó (33.500 mill. de tn.). La evolución de las emisiones a lo largo de ese periodo se muestra en el Gráfico 1. Como se puede observar en dicho gráfico, tras un periodo de crecimiento intenso entre los años 2003 y 2007, a partir de este último año el crecimiento se modera y los incrementos anuales son cada vez menores. En 2015 las emisiones aumentaron un 0,1% con respecto al año anterior.

Gráfico 1. Emisión anual de CO₂ a la atmósfera (mill. de tn.)

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de BP (2016).

Además de la evolución de las emisiones totales, resulta relevante analizar las de las mayores zonas emisoras de carbono, que en estos momentos son China (27,3% de las emisiones totales de 2015), Europa y Eurasia⁵ (18,5%) y Estados Unidos (16,4%). Tal y como se puede apreciar en el Gráfico 2, China inicia un crecimiento muy pronunciado en el año 2002, el cual se mantiene hasta 2011. Durante este periodo supera y marca grandes diferencias con Estados Unidos y el área de Europa y Eurasia. A partir de 2011, la cifra se estabiliza. Si se hace un balance de la última década se puede apreciar que las emisiones de China se han multiplicado por 3. En lo que respecta a Europa y Eurasia se puede apreciar cómo se ha producido una corrección a partir de los inicios de la década de los 90 del siglo pasado. En cambio, la corrección en los Estados Unidos ha sido más tardía (a partir de 2007) y menos pronunciada.

Asimismo es interesante analizar los valores relativos de emisiones por países de los últimos años. En la Tabla 1 se muestra, para los 30 países más emisores del mundo, el volumen total emitido en el año 2015 y varios ratios seleccionados. Los dos países que están al frente del volumen de emisiones -China y Estados Unidos- son responsables del 43,7% del total de emisiones. Sus ratios muestran diferencias notables. La emisiones de CO₂ por habitante de los Estados Unidos (17,1 mill. tn. por habitante) son 2,5 veces las de China (6,7). Podemos explicar este ratio aplicando el siguiente desglose:

5 Los países que se incluyen en Eurasia son los siguientes: Armenia, Azerbaiyán, Bielorrusia, Kazajstán, Kirguistán, Moldavia, Rusia, Tayikistán, Turkmenistán, Ucrania y Uzbekistán.

$$\frac{\text{Emisiones } CO_2}{\text{Habitantes}} = \frac{\text{Energía primaria}}{\text{Habitantes}} \times \frac{\text{Emisiones } CO_2}{\text{Energía primaria}} \quad [1]$$

Tal y como se muestra en la Tabla 1, el ratio de consumo de energía primaria por habitante de Estados Unidos es de 7,2 mill. toneladas equivalentes de petróleo (tep)⁶ por habitante, mientras que el de China es de 2,2. El ratio de Estados Unidos solo es superado por Canadá, Singapur y los países árabes productores de petróleo. El elevado uso energético derivado del transporte explica el ratio de los Estados Unidos. En cambio el ratio de emisiones en relación con el consumo de energía primaria es superior en China (3 tn. de CO₂ por cada tep de energía consumida) que en los Estados Unidos (2,4). La razón de esta diferencia se encuentra en que, a pesar de que la distribución de consumo de energía primaria entre fósiles y no fósiles es similar en ambos países (88%-12% en China y 86%-14% en Estados Unidos, ver Tabla 2), el uso del carbón como energía primaria es extremadamente elevado en China, alcanzando una tasa del 64% (17% en los Estados Unidos).

La comparación entre ambos países puede completarse con el análisis del ratio de emisiones de CO₂ sobre PIB (tn. de emisiones de CO₂ por cada mill. de dólares de PIB). Tal y como se muestra en la Tabla 3, el ratio de China (842,4) es 2,75 veces superior al de Estados Unidos (305,7). Este ratio se puede analizar realizando el siguiente desglose:

$$\frac{\text{Emisiones } CO_2}{\text{PIB}} = \frac{\text{Emisiones } CO_2}{\text{Energía primaria}} \times \frac{\text{Energía primaria}}{\text{PIB}} \quad [2]$$

A través del ratio de energía primaria sobre PIB se puede observar que la economía china, muy intensiva en el sector industrial en los últimos años, explica en buena parte el mayor valor de este ratio (277,4 tep por millón de dólares de PIB en China frente a 127,1 en Estados Unidos). El otro elemento que influye es el ratio de emisiones de CO₂ sobre consumo de energía primaria, el cual se analizó anteriormente.

Un elemento positivo de cara al futuro, junto con las mejoras en eficiencia, es el mayor peso que el sector servicios está adquiriendo en la economía china. Desde el año 2013 el sector servicios presenta un mayor porcentaje que el industrial en el PIB. En cualquier caso, la reducción de las emisiones de CO₂

6 La tep es una unidad de energía. Equivale a la energía que produce la combustión de una tonelada de petróleo, la cual, de acuerdo con la definición de la Agencia Internacional de la Energía, equivale a 10⁷ Kcal. De acuerdo con el índice de generación energética del resto de fuentes primarias, se obtiene un total agregado para todas las fuentes de energía primaria.

en China viene condicionada, en gran medida, por la reducción en el uso del carbón como fuente de energía primaria.

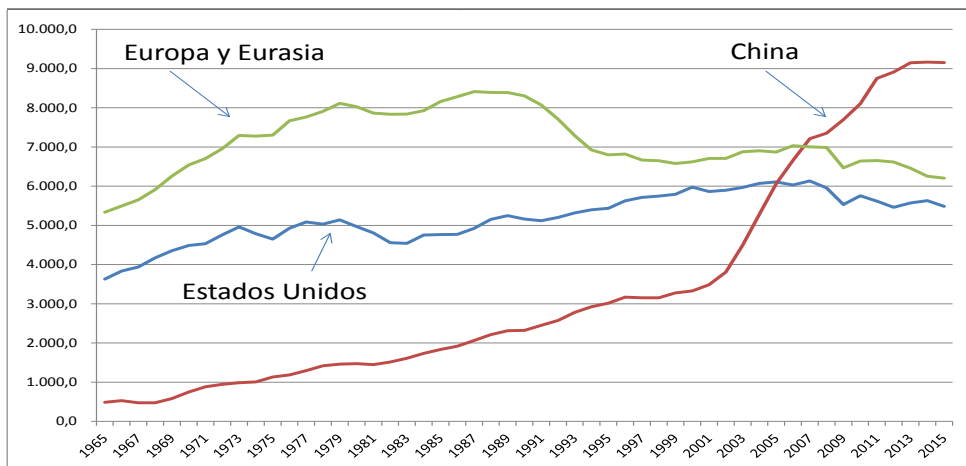
En cuanto al resto de países incluidos en las tablas 1 y 2 cabe realizar los siguientes comentarios de interés:

1. India es el tercer país emisor de CO₂, con un 6,6% del total mundial. Su ratio de emisiones por habitante es muy bajo (1,7), el cual bien determinado por el bajo ratio de consumo de energía primaria por habitante. En cambio su economía es muy ineficiente en términos de emisiones de CO₂, ya que cada mill. de euros de PIB supone la emisión de más de 1.000 tn. de CO₂. A ello contribuye el elevado uso del carbón como fuente de energía primaria (58% del total).
2. El cuarto emisor mundial, Rusia, presenta un ratio de emisiones sobre PIB mayor que India, pero la explicación no se encuentra en la intensa utilización del carbón como fuente de energía primaria, sino en el elevado ratio de energía primaria sobre PIB (más de 500 tep por mill. de euros de PIB). A pesar del uso contenido del carbón, Rusia emplea energías fósiles en un 88%, lo cual incide en el elevado ratio de emisiones de CO₂ por habitante (10,3).
3. Hay un grupo de países (Japón, Corea del Sur, Canadá, Australia y Holanda) con un elevado ratio de emisiones por habitante (entre 12,4 y 16,8) pero con un ratio de emisiones de CO₂ por PIB a un nivel contenido a pesar de su desarrollo económico. Japón, Holanda y Australia presentan un ratio por debajo de 300 tn de emisiones de CO₂ por mill. de dólares de PIB. Corea del Sur (343) y Canadá (485) presentan valores superiores.
4. Las grandes economías de la Unión Europea (Alemania, Francia, Italia y España) y Reino Unido muestran ratios de emisiones de CO₂ por habitante y PIB a unos niveles comparativamente buenos en relación con otros países desarrollados, en especial Francia, Italia y el Reino Unido. Los datos de Francia son los mejores (4,6 mil. tn. CO₂ por hab. y 127 tn. CO₂ por mill. USD de PIB). Los datos de este país están influenciados por el uso de la energía nuclear como fuente de energía primaria (41% del total), lo cual hace que la distribución de energías primarias entre fósiles y no fósiles sea del 50%-50%.
5. Los países árabes productores de petróleo incluidos en las tablas 2 y 3 (Arabia Saudita, Irán y Emiratos Árabes Unidos) muestran los peores datos, tanto en emisiones por habitantes como por PIB. La abundancia de petróleo, y de gas natural en algún caso (Irán), junto con la estrategia de elevadas subvenciones por el uso de la energía por parte de la

población y la escasa sensibilidad por los aspectos relacionados con el medio ambiente son las causas que explican esos ratios.

6. Los casos de Sudáfrica, Ucrania y Singapur son especialmente singulares por su elevada ineficiencia energética.

Gráfico 2. Emisión anual de CO₂ a la atmósfera (mill. de tn.) por países



Fuente: Elaboración propia con datos tomados de BP (2016).

Tabla 1. Ratios relacionados con la emisión de CO₂ por países

	Emisión CO ₂ en 2015		Consumo de energía primaria en 2015		Ratios relevantes				
	(mill. de tn.)	% s/ total mundial	(mill. de tn. equivalentes de petróleo)	% s/ total mundial	Emisiones de CO ₂ por habitante (1) = (2) x (3)	Consumo de energía primaria por habitante (2)	Emisiones de CO ₂ sobre consumo de energía primaria (3)	Emisiones de CO ₂ sobre PIB (4) = (3) x (5)	Consumo de energía primaria sobre PIB (5)
1 China	9.153,9	27,3%	3.014,0	22,9%	6,7	2,2	3,0	842,4	277,4
2 Estados Unidos	5.485,7	16,4%	2.280,6	17,3%	17,1	7,1	2,4	305,7	127,1
3 India	2.218,4	6,6%	700,5	5,3%	1,7	0,5	3,2	1.069,9	337,8
4 Rusia	1.483,2	4,4%	666,8	5,1%	10,3	4,6	2,2	1.118,5	502,9
5 Japón	1.207,8	3,6%	448,5	3,4%	13,1	4,8	2,7	292,9	108,8
6 Alemania	753,6	2,2%	320,6	2,4%	9,3	3,9	2,4	224,6	95,6
7 Corea del Sur	648,7	1,9%	276,9	2,1%	12,8	5,5	2,3	484,9	207,0
8 Irán	630,2	1,9%	267,2	2,0%	8,0	3,4	2,4	1.481,7	628,3
9 Arabia Saudi	624,5	1,9%	264,0	2,0%	19,8	8,4	2,4	966,8	408,6
10 Indonesia	611,4	1,8%	195,6	1,5%	2,4	0,8	3,1	709,4	227,0
11 Canadá	532,5	1,6%	329,9	2,5%	14,9	9,2	1,6	343,4	212,8
12 Brasil	487,8	1,5%	292,8	2,2%	2,3	1,4	1,7	274,9	165,0
13 México	474,2	1,4%	185,0	1,4%	3,7	1,5	2,6	414,4	161,7
14 Reino Unido	436,9	1,3%	191,2	1,5%	6,7	2,9	2,3	153,4	67,1
15 Sudáfrica	436,5	1,3%	124,2	0,9%	8,0	2,3	3,5	1.395,5	397,2
16 Australia	400,2	1,2%	131,4	1,0%	16,8	5,5	3,0	298,8	98,1
17 Italia	341,5	1,0%	151,7	1,2%	6,8	3,0	2,3	164,9	73,2
18 Turquía	336,3	1,0%	131,3	1,0%	4,3	1,7	2,6	468,3	182,8
19 Francia	309,4	0,9%	239,0	1,8%	4,6	3,6	1,3	127,8	98,7
20 Tailandia	295,9	0,9%	124,9	0,9%	4,4	1,8	2,4	748,3	315,8
21 Polonia	295,8	0,9%	95,0	0,7%	7,8	2,5	3,1	623,1	200,0
22 España	291,7	0,9%	134,4	1,0%	6,3	2,9	2,2	243,3	112,1
23 Taiwan	268,5	0,8%	110,7	0,8%	11,4	4,7	2,4	569,1	234,6
24 Emiratos Árabes Un.	264,7	0,8%	103,9	0,8%	28,8	11,3	2,5	714,7	280,7
25 Malasia	246,9	0,7%	93,1	0,7%	8,2	3,1	2,7	833,7	314,4

	Emisión CO2 en 2015		Consumo de energía primaria en 2015		Ratios relevantes				
	(mill. de tn.)	% s/ total mundial	(mill. de tn. equivalentes de petróleo)	% s/ total mundial	Emisiones de CO2 por habitante (1) = (2) x (3)	Consumo de energía primaria por habitante (2)	Emisiones de CO2 sobre consumo de energía primaria (3)	Emisiones de CO2 sobre PIB (4) = (3) x (5)	Consumo de energía primaria sobre PIB (5)
26 Egipto	212,1	0,6%	86,2	0,7%	2,3	0,9	2,5	641,4	260,6
27 Holanda	210,1	0,6%	81,6	0,6%	12,4	4,8	2,6	279,2	108,5
28 Singapur	205,0	0,6%	80,2	0,6%	37,3	14,6	2,6	700,2	274,0
29 Ucrania	195,1	0,6%	85,1	0,6%	4,3	1,9	2,3	2.153,2	939,0
30 Argentina	190,0	0,6%	87,8	0,7%	4,4	2,0	2,2	469,6	217,1
Total Mundial	33.508,4	100,0%	13.147,3	100,0%	4,6	1,8	2,5	456,3	179,0

(1) Medido como mil. de tn. de CO2 por cada habitante

(2) Medido como mil. de tep por cada habitante

(3) Medido como tn. de CO2 por tn de petróleo equivalente de consumo de energía primaria

(4) Medido como tn. de CO2 por cada millón de dólares de PIB

(5) Medido como tep por cada millón de dólares de PIB

Fuente: Elaboración propia con datos de BP(2016) y World Bank (2016)

Tabla 2. Consumo de energía primaria en 2015

	(mill. de tn. equivalentes de petróleo)	Energías fósiles (%)	Energías no fósiles (%)	Petróleo y gas (%)	Carbón (%)	Energía Renovable nuclear (%)	Energía Renovable hidroeléctrica (%)
1 China	3.014,0	88%	12%	24%	64%	1%	11%
2 Estados Unidos	2.280,6	86%	14%	69%	17%	8%	6%
3 India	700,5	93%	7%	34%	58%	1%	6%
4 Rusia	666,8	88%	12%	74%	13%	7%	6%
5 Japón	448,5	92%	8%	65%	27%	0%	8%
6 Alemania	320,6	80%	20%	55%	24%	6%	14%
7 Corea del Sur	276,9	86%	14%	55%	30%	13%	1%
8 Irán	267,2	98%	2%	98%	0%	0%	2%
9 Arabia Saudí	264,0	100%	0%	100%	0%	0%	0%
10 Indonesia	195,6	97%	3%	56%	41%	0%	3%
11 Canadá	329,9	64%	36%	58%	6%	7%	29%
12 Brasil	292,8	65%	35%	59%	6%	1%	33%
13 México	185,0	93%	7%	86%	7%	1%	6%
14 Reino Unido	191,2	82%	18%	70%	12%	8%	10%
15 Sudáfrica	124,2	97%	3%	29%	68%	2%	1%
16 Australia	131,4	94%	6%	59%	35%	0%	6%
17 Italia	151,7	84%	16%	76%	8%	0%	16%
18 Turquía	131,3	86%	14%	59%	26%	0%	14%
19 Francia	239,0	50%	50%	47%	4%	41%	8%
20 Tailandia	124,9	98%	2%	83%	14%	0%	2%
21 Polonia	95,0	95%	5%	42%	52%	0%	5%
22 España	134,4	74%	26%	64%	11%	10%	16%
23 Taiwan	110,7	91%	9%	57%	34%	7%	2%
24 Emiratos Árabes U	103,9	100%	0%	98%	2%	0%	0%
25 Malasia	93,1	96%	4%	77%	19%	0%	4%
26 Egipto	86,2	96%	4%	95%	1%	0%	4%
27 Holanda	81,6	96%	4%	83%	13%	1%	3%
28 Singapur	80,2	100%	0%	99%	0%	0%	0%
29 Ucrania	85,1	75%	25%	40%	34%	23%	2%
30 Argentina	87,8	86%	14%	85%	2%	2%	12%
Total Mundial	13.147,3	86%	14%	57%	29%	4%	10%

Fuente: Elaboración propia con datos de BP(2016) y World Bank (2016)

3. COSTE SOCIAL DEL CARBONO

Como se ha expuesto en el apartado 1 de este trabajo, hay un amplio consenso en que el causante del cambio climático está en las elevadas emisiones de gases de efecto invernadero, en especial del carbono contenido en el CO₂, como consecuencia de la actividad económica humana. Una forma de evaluar económicamente el impacto de las emisiones de CO₂ es mediante el cálculo del denominado Coste Social del Carbono (CSC), el cual se puede definir como una estimación monetaria de los daños que ocasiona la emisión de una tonelada (tn.) de carbono a la atmósfera en un año dado.

Las estimaciones realizadas sobre el CSC provienen de las simulaciones realizadas mediante los denominados Modelos Integrales de Valoración (MIV). Pindyck (2013) expone claramente cuáles son las características esenciales de estos modelos:

1. Estimación de las emisiones futuras de CO₂ bajo un escenario en el que no se toma ninguna iniciativa de lucha contra el cambio climático y bajo diferentes escenarios en los que sí se hace. Estas proyecciones se basan en escenarios de crecimiento del PIB y de la intensidad en carbono de la producción de los bienes y servicios incluidos en el PIB.
2. Estimación del CO₂ que se concentrará en la atmósfera de acuerdo con la concentración actual y las emisiones futuras.
3. Estimación del impacto que las concentraciones de CO₂ en la atmósfera tendrán sobre la temperatura, el nivel del mar y los acontecimientos meteorológicos adversos.
4. Estimación del impacto económico que tendrá el aumento de la temperatura en los otros efectos medioambientales mencionados en el punto anterior. El impacto económico se mide mediante una estimación de la reducción en el consumo y el PIB, así como en la monetización de los impactos negativos sobre la salud humana.
5. Estimación del coste de las iniciativas de reducción de la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. En este aspecto es esencial plantear una previsión acerca del avance tecnológico que permita reducir dichos costes.
6. Hipótesis sobre utilidad y preferencia temporal acerca de los costes que conllevan las políticas que combaten el cambio climático.

La metodología general para el cálculo del CSC se basa en el cálculo del daño económico (D) que genera el aumento de las temperaturas. Tal y como indica IPCC (2014), se considera un escenario de emisiones de CO₂ para el futuro (E_0, E_1, \dots, E_t) y de acuerdo con las especificaciones del modelo MIV utilizado se

obtiene una senda de variación de temperaturas. El daño económico se calcula a través de la relación que define el modelo entre el cambio de temperatura y el impacto en el PIB. El elemento clave en este análisis es la determinación de los parámetros que definen esa relación. La mayor parte de los modelos definen esos parámetros como una variable estocástica, dada la dificultad para determinarlos con precisión. En cualquier caso, la función de daños es convexa, al objeto de definir un daño marginal creciente.

El cálculo del valor concreto del CSC se obtiene mediante un proceso de dos etapas (IPCC, 2014). En la primera de ellas se obtiene el valor actualizado (VA), en el momento del cálculo, de la función de daño económico para un año determinado "t":

$$VA_D = \int_0^{\infty} D(\Delta T_t) dt \quad [3]$$

En la segunda etapa, se obtiene el daño marginal o CSC ante una variación de las emisiones en el momento inicial (E_0):

$$CSC_0 = \frac{\partial VA_D}{\partial E_0} \quad [4]$$

Una estimación reciente y conocida del CSC es la publicada por la US Environmental Protection Agency (2015), cuyos resultados se muestran en la Tabla 3. Esta agencia norteamericana obtiene el CSC calculando la media de los resultados obtenidos en los tres modelos del tipo MIV más reconocidos: DICE (Dynamic Integrated Climate and Economy), PAGE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect) y FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution)⁷. Como se puede apreciar, el resultado es muy sensible a la tasa de descuento utilizada (d), la cual es una variable que depende de dos factores: la tasa de preferencia temporal (δ) y la tasa de descuento del consumo futuro (ρ) (Pindyck, 2013; Stern, 2006; Heal, 2009).

Cuanto mayor sea δ menor es el valor que se le da en el momento de la valoración a los daños futuros que ocasionará el aumento de las temperaturas. O dicho de otra manera, dado que el horizonte temporal de los daños sobrepasa con creces la esperanza de vida de las personas que viven en estos momentos, a mayor δ menor es la valoración que se hace de los daños que sufren las generaciones futuras. En un contexto de solidaridad intergeneracional dicha tasa ha de ser baja. Incluso debe de ser de cero (Heal, 2009), lo que en tal caso sig-

7 El modelo DICE fue desarrollado inicialmente a principios de los años noventa del siglo pasado (Nordhaus, 1993), aunque luego ha sido actualizado (Nordhaus, 2008). El modelo FUND ha contado con la financiación de Holanda y el apoyo de la Unión Europea. Una descripción del mismo se encuentra en Tol (2002-a y 2002-b). El modelo PAGE también se empezó a desarrollar en 1991 y fue actualizado en 2002. Los fundamentos del mismo se pueden encontrar en Hope (2006).

nificaría que valoramos los daños de las generaciones futuras como si fuesen daños nuestros. Incluso se podría considerar una tasa negativa, tal y como proponen Weitzman (1998) y Stern (2008), lo cual significa valorar más los daños que sufrirían las generaciones futuras que los nuestros. Así pues, el valor de δ es una variable exógena determinada por principios éticos.

La tasa de descuento del consumo futuro depende de tres variables (Heal, 2009). Una de ellas es la propia δ , la cual es exógena. En caso de que se opte por un valor de cero, solo nos quedarían dos variables, las cuales son de carácter endógeno. La primera de ellas sería la tasa de crecimiento de los flujos que estamos descontando, la cual se puede aproximar por la tasa de crecimiento del consumo. La segunda variable es la aversión relativa al riesgo (η) dentro del contexto de una función de utilidad.

El consenso de expertos acerca de qué tasa de descuento utilizar se encuentra en el 3% (Howard and Sylvan, 2015). Esta es la tasa utilizada por la Agencia de Protección Ambiental norteamericana en su escenario central y en el análisis de estrés.

Las bases para el cálculo del CSC (MIV y elección de la tasa de descuento) no son muy sólidas. De acuerdo con Pindyck (2013) hay elecciones arbitrarias en lo concerniente a los elementos que configuran la tasa de descuento y a las funciones y parámetros que estiman las futuras pérdidas y ganancias como consecuencia de las políticas de lucha contra el cambio climático. Todas estas limitaciones de los modelos no son una excusa para poner en duda las evidencias que muestran el cambio climático y, ni mucho menos, la necesidad de implementar medidas de descarbonización de la economía que limiten el aumento de las temperaturas. Las políticas de descarbonización de la economía son una forma de seguro que se ha de implementar para evitar, en la medida de lo posible, los daños, incluidos los procedentes de escenarios posibles de estrés, que el cambio climático puede ocasionar a la humanidad (Buñuel, 1999). Estamos en total sintonía con Stern (2008) cuando afirmaba que las emisiones de gases de efecto invernadero son externalidades y representan el mayor fallo de mercado que ha sufrido el mundo.

Tabla 3. Estimación del Coste Social del Carbono en julio de 2015 en el período 2015-2050 (dólares de 2007 por tn. de CO₂)

Año	Tasa de descuento			
	Media del 5%	Media del 3%	Media del 2,5%	Percentil 95 con media del 3%
2015	11	36	56	105
2020	12	42	62	123
2025	14	46	68	138
2030	16	50	73	152
2035	18	55	78	168
2040	21	60	84	183
2045	23	64	89	197
2050	26	69	95	212

Fuente: US-EPA (2015).

4. GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En este apartado se abordan las cuestiones esenciales que conlleva la gestión del cambio climático. Comenzamos por las diferentes políticas que se pueden implementar para luchar contra el cambio climático. A continuación se exponen los acuerdos internacionales alcanzados hasta la fecha. Posteriormente se procede a realizar un análisis económico de las políticas públicas.

4.1 Tipos de políticas frente al cambio climático

Podemos plantearnos tres tipos de política para abordar el problema del cambio climático: una política de adopción de contramedidas para contrarrestar el aumento de las temperaturas, una política de adaptación y una política de prevención o mitigación de las causas que generan el problema. La elección de la política o combinación de políticas óptima se ve afectada de manera sustancial por el hecho de que el problema del cambio climático presenta las características de incertidumbre e irreversibilidad. Las principales incertidumbres rodean a la relación entre el aumento de la concentración atmosférica de los GEI y el calentamiento global que generan, así como a las consecuencias de dicho calentamiento. Sin embargo, la evidencia científica es suficiente para que sepamos que si mantenemos las tasas actuales de emisión de GEI las temperaturas medias globales aumentarán de forma muy significativa y que, aunque las consecuencias de este aumento son inciertas, el riesgo de que sean irreversibles y muy costosas, cuando no catastróficas, es muy elevado. En consecuencia,

parece claro que la primera recomendación que debemos hacer es la de proseguir con la investigación científica que nos permita disminuir la incertidumbre tanto como sea posible.

La primera de las políticas antes mencionadas consiste en el uso de técnicas de gestión de la radiación solar o SRM (*Solar Radiation Management*), que tienen como objetivo aumentar ligeramente la reflexión solar con el objetivo de disminuir la temperatura de la atmósfera. Esto se consigue lanzando partículas a la atmósfera, esencialmente compuestos sulfúricos, y mediante técnicas de modificación de las nubes (IPCC, 2014; Royal Society, 2009). Los partidarios de este tipo de técnica de geoingeniería la plantean como una alternativa a las estrategias y políticas de adaptación y mitigación. Algunos de ellos rechazan directamente las políticas de adaptación por las necesidades de cambios que requieren sobre el entramado industrial y empresarial (The New York Times, 2015).

Aunque hay partidarios del uso de la SRM, son muchos más los detractores de la geoingeniería como alternativa a la adaptación y mitigación. La geoingeniería presenta grandes inconvenientes (Corner y Pidgeon, 2010; y Dilling y Hauser, 2013). En primer lugar, hay una serie de riesgos físicos y de efectos negativos de impacto medioambiental. En segundo lugar, se plantean cuestiones éticas relacionadas con la manipulación intencionada del clima. Es cierto que el ser humano ya ha realizado diversas modificaciones relacionadas con la naturaleza, pero las implicaciones de ésta sobre las generaciones futuras sobrepasan con creces las anteriores. Por otro lado, tal y como señala Schneider (1989) la geoingeniería basada en técnicas SRM lleva asociada altas dosis de incertidumbre.

Por lo tanto, hoy en día se entiende que las únicas políticas razonables son la adaptación y la mitigación. No obstante, la geoingeniería podría ser una alternativa en forma de recurso de última instancia en caso de un fracaso futuro de las políticas de adaptación y mitigación (IPCC, 2015).

La adaptación al cambio climático es defendida como única política razonable por todos aquellos que argumentan que las grandes incertidumbres que rodean a este problema no justifican que se adopten medidas de prevención o mitigación que pueden ser tremendamente costosas en el presente y cuya finalidad es la incierta obtención de beneficios futuros. Quienes así piensan sostienen que las inversiones que la sociedad puede realizar para prevenir el calentamiento global son muy arriesgadas, por lo que, cuando tales inversiones son evaluadas, se debe añadir una prima de riesgo muy elevada a las mismas y a los futuros e inciertos beneficios que generan.

La evaluación de cualquier inversión en prevención o mitigación del cambio climático cuyos beneficios (B) y costes (C) se extienden en el tiempo requiere que estimemos el valor actualizado del retorno esperado de la inversión ($VAREI$). En el caso continuo,

$$VAREI = E \int_0^T (B_t - C_t) e^{-rt} dt, \quad [5]$$

donde T es el último periodo en nuestro horizonte temporal, r es el tipo de descuento y t es el periodo de tiempo. Puesto que la incertidumbre afecta principalmente a los efectos del cambio climático, lo incierto es el beneficio de la inversión preventiva, que se producirá en periodos distantes. Por lo que respecta a los costes, podemos asumir que son conocidos y que se producen en el periodo actual. Por tanto, podemos reescribir la expresión anterior del siguiente modo:

$$VAREI = E \int_{t_0}^T B_t e^{-rt} dt - C_0, \quad [6]$$

donde t_0 es el periodo en el que los beneficios empiezan a producirse, puesto que $B_t = 0$ para $t < t_0$, y $C_t = 0$ para $t > 0$.

Resulta claro que el tipo de descuento sólo afecta a nuestra percepción del beneficio de la inversión y que

$$\Pr(VAREI \leq 0) = \Pr(C_0 \geq E \int_{t_0}^T B_t e^{-rt} dt), \quad [7]$$

que tiende a 1 a medida que $t_0 \rightarrow T = \infty$, o a medida que $r \rightarrow \infty$. Es decir, cuanto más distante en el tiempo esté el periodo en el que empiezan a producirse los beneficios y cuanto mayor sea el tipo de descuento, menos probable será que un proyecto de inversión en mitigación se lleve a cabo. Por tanto, añadir una prima de riesgo elevada al tipo de descuento supondría que se aceptasen menos proyectos de inversión en prevención. Sólo aquellos proyectos que generasen beneficios inmediatamente tendrían altas probabilidades de llevarse a cabo. Por supuesto, este tipo de proyectos es el menos controvertido, pues se trata de políticas preventivas de las que no cabe arrepentirse en ningún caso, como evitar la deforestación antieconómica o mejorar la eficiencia energética, que son deseables incluso sin la preocupación por el cambio climático.

Por otra parte, no existe acuerdo sobre cuál debe ser el tipo de descuento usado, si es que debe usarse alguno. La productividad marginal del capital podría ser la respuesta económica, pero muchos otros factores la ponen en duda. En última instancia, la discusión sobre el tipo de descuento es un tema de equidad intergeneracional. Desde esta perspectiva, lo que importa es que, salvo que invirtamos dinero en la actualidad para compensar las pérdidas que se produzcan en el futuro, cualquier descuento supone distribuir beneficios hoy cuyos costes serán pagados en años venideros. Es decir, el argumento que sugiere que se añada una prima de riesgo para descontar las inversiones mitigadoras porque generan costes ciertos hoy y beneficios inciertos en el futuro

puede revertirse completamente basándonos en razones de equidad intergeneracional. En este sentido, puede argumentarse que las emisiones de GEI producen beneficios hoy (los derivados de las actividades emisoras) y generan costes en el futuro (los daños causados por el calentamiento global), los cuales, aunque inciertos, pueden ser catastróficos e irreversibles. Por tanto, el descuento crea un riesgo de infraprotección de las generaciones futuras, que pueden tener que pagar un precio enorme por el bienestar de las generaciones presentes. De este modo, si un enfoque de aversión al riesgo parece preferible a uno de neutralidad y aceptamos una prima de riesgo, ésta puede que tenga que ser negativa, porque el riesgo considerado no es el de incurrir en costes hoy que pueden no ser necesarios, sino el de qué daños catastróficos e irreversibles pueden ocurrir en el futuro.

Además, existen otros dos argumentos en contra de añadir una prima de riesgo al tipo de descuento. En primer lugar, puede que los tipos de descuento de mercado ya tengan una prima de riesgo excesiva porque tienen en cuenta riesgos que son privados pero no sociales, puesto que para la sociedad en su conjunto esos riesgos están completamente diversificados. En segundo lugar, los costes y (lo que es más relevante) los beneficios se miden de acuerdo a las preferencias de las generaciones presentes, aunque las preferencias de las generaciones futuras pueden ser diferentes, lo que resulta en que no se tengan en cuenta las oportunidades de las que se priva a estas generaciones. Esto refuerza la idea de una prima de riesgo negativa para proteger a las generaciones futuras.

En definitiva, el elevado riesgo de que las consecuencias del cambio climático sean irreversibles y catastróficas hace inadmisibile la inacción, en tanto que las incertidumbres que rodean al problema del cambio climático sean despejadas (*principio de precaución*). Por el contrario, "lo racional desde el punto de vista económico es proceder a *asegurarnos* frente al riesgo. El *seguro de calentamiento global* supone actuar hoy frente al problema para reducir el riesgo, aun a costa de incurrir en ciertos costes, que equivaldrían a la *prima de seguro*" (Buñuel, 1999, p. 188). Sin embargo, es casi seguro que el nivel óptimo de este seguro frente al cambio climático implique que debemos permitir que cierto grado de cambio climático llegue a producirse, con lo que las políticas de adaptación al calentamiento global resultan igualmente pertinentes.

Una vez que hemos descartado las contramedidas de ingeniería para evitar el aumento de las temperaturas como una solución viable en la actualidad, las políticas de prevención o mitigación constituyen la forma de adquirir el seguro de calentamiento global. Estas políticas persiguen disminuir el calentamiento global limitando las causas que lo originan, es decir, la creciente concentración de GEI en la atmósfera. Como ya hemos señalado antes, existen algunas polí-

ticas preventivas que son deseables incluso sin considerar sus efectos mitigadores del calentamiento global (deforestación antieconómica o aumento de la eficiencia energética). Sin embargo, no parece que estas políticas basten para reducir las emisiones de GEI hasta niveles aceptables, es decir, para proporcionar el seguro óptimo frente al problema del cambio climático, por lo que se necesitan políticas complementarias. De entre ellas, la disminución del uso de combustibles fósiles es la principal política de mitigación propuesta, pues constituye la manera más efectiva de reducir las emisiones de GEI. Esta disminución puede producirse a través de un aumento de la eficiencia energética, nuevas técnicas de producción y nuevos productos y servicios que requieran un menor uso de combustibles fósiles, su sustitución por otras fuentes de energía y una disminución de la demanda final de energía. Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) también pueden reducirse sustituyendo los combustibles fósiles con mayor contenido de carbono, como el carbón, por otros con un contenido menor, como el gas natural, así como mediante técnicas de captura y almacenamiento del carbono.

La necesidad de acometer medidas preventivas que limiten las emisiones de los GEI ha conducido a la firma de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y, dentro de la misma, al Protocolo de Kioto y, más recientemente, al Acuerdo de París. No obstante, la gran incertidumbre que rodea al problema y nuestra deficiente información hacen imposible que seamos capaces de determinar en la práctica el nivel de seguro óptimo, por lo que hemos de conformarnos con fijar objetivos de reducción de emisión arbitrarios a través del proceso político de negociación internacional, si bien entendemos que esos objetivos nos acercan más al nivel óptimo de seguro de calentamiento global. De esta forma, en lugar del (desconocido) seguro óptimo fijamos lo que entendemos que es un nivel de seguro *razonable*.

4.2 Acuerdos internacionales

La gravedad de las consecuencias del cambio climático llevó a la firma de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) en 1992, que tiene como objetivo la estabilización de la concentración atmosférica de los GEI a un nivel que impida interferencias de origen antropogénico peligrosas para el sistema climático. Sin embargo, la CMCC se limita a reconocer la existencia del problema, estableciendo mínimas obligaciones para las Partes, siguiendo la práctica habitual del derecho internacional medioambiental de acordar convenios marcogenéricos, que posteriormente se desarrollan por acuerdos denominados protocolos. De este modo, se obtiene una amplia participación en los convenios internacionales, para que una vez que exista la voluntad política necesaria puedan adoptarse compromisos que doten de con-

tenido concreto a las disposiciones genéricas de los convenios marco. En 1997 se fijaron compromisos concretos de reducción de las emisiones de GEI para los países desarrollados en el Protocolo de Kioto, adoptado en la Tercera Sesión de la Conferencia de las Partes (COP 3), órgano supremo de la CMCC.

La principal característica del Protocolo de Kioto es que establece para los países desarrollados (incluyendo los países con sistemas económicos en transición en aquella época; es decir, los países del Este de Europa) la limitación y reducción cuantificada de sus emisiones de seis GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano, óxido nitroso, carburos perfluorados, carburos hidrofluorados y hexafluoruro de azufre. Dichos países asumieron el compromiso de reducir, individual o conjuntamente, durante el quinquenio 2008-2012 al menos un 5% de sus emisiones antropógenas de los seis gases objeto de control, con respecto de sus emisiones en 1990. El objetivo global de un 5% de reducción se repartió entre las partes firmantes según lo mostrado en la Tabla 4. No obstante, no todos los firmantes del Protocolo llegaron a ratificarlo. En particular, EEUU nunca lo hizo, por lo que no acabó comprometido a la reducción del 7% que había firmado. La UE asumió un compromiso global de reducción del 8%, que repartió entre sus Estados miembros de acuerdo a lo indicado en la Tabla 5. Como resultado, a España se le permitió aumentar sus emisiones hasta un 15%. A punto de concluir el primer periodo de compromiso, comprendido entre 2008 y 2012, se acordó prorrogar la vigencia del Protocolo hasta 2020, aunque con menos participantes, a la espera de alcanzar un nuevo acuerdo internacional al que pudieran sumarse todos los países, que no llegó hasta el Acuerdo de París. En el segundo periodo de compromiso de la prórroga del Protocolo de Kioto, la UE adoptó un compromiso unilateral de reducir sus emisiones en un 20% en 2020.

Tabla 4. Compromisos de reducción de emisiones de GEIs del Protocolo de Kioto

Alemania	8%	Finlandia	8%	Noruega	+1%
Australia	+8%	Francia	8%	Nueva Zelanda	0%
Austria	8%	Grecia	8%	Países Bajos	8%
Bélgica	8%	Hungría*	6%	Polonia*	6%
Bulgaria*	8%	Irlanda	8%	Portugal	8%
Canadá	6%	Islandia	+10%	Reino Unido	8%
Croacia*	5%	Italia	8%	República Checa*	8%
Dinamarca	8%	Japón	6%	Rumania*	8%
Eslovaquia*	8%	Letonia*	8%	Rusia*	0%
Eslovenia*	8%	Liechtenstein	8%	Suecia	8%

España	8%	Lituania*	8%	Suiza	8%
Estados Unidos	7%	Luxemburgo	8%	Ucrania*	0%
Estonia*	8%	Mónaco	8%	Unión Europea	8%

* Países con sistemas económicos en transición a una economía de mercado.

Fuente: Naciones Unidas (1998, Anexo B).

Tabla 5: Reparto intracomunitario del compromiso de reducción de emisiones de GEI de la UE en el Protocolo de Kioto

Alemania	21,0%	Irlanda	13,0%
Austria	13,0%	Italia	6,5%
Bélgica	7,5%	Luxemburgo	28,0%
Dinamarca	21,0%	Países Bajos	6,0%
España	15,0%	Portugal	27,0%
Finlandia	0,0%	Reino Unido	12,5%
Francia	0,0%	Suecia	4,0%
Grecia	25,0%	TOTAL	8,0%

Fuente: Consejo de las Comunidades Europeas (2002, Anexo II).

Otra característica fundamental del Protocolo de Kioto es que se prevé la posibilidad de que los países con compromisos cuantitativos de reducción usen dos vías alternativas a la reducción de emisiones propias para cumplir con dichos compromisos. La primera de esas vías consiste en el uso de los llamados sumideros (cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un GEI o un precursor de un GEI en la atmósfera). La segunda vía alternativa es la formada por los llamados *mecanismos de flexibilidad*, que persiguen disminuir el coste para los países desarrollados de cumplir con sus obligaciones y contribuir al desarrollo sostenible mediante la promoción de proyectos encaminados a reducir la emisión de GEI. En particular, el Protocolo prevé tres mecanismos:

1. El *comercio de los derechos de emisión*: posibilita que un país que emite menos de lo que le está permitido venda la parte de su cuota de emisión no usada a un segundo país, de forma que éste pueda emitir la suma de su cuota original más la comprada al primero.
2. La *aplicación conjunta (joint implementation)*: permite a las Partes del Anexo I del Protocolo de Kioto (los países desarrollados, incluyendo los países con economías en transición) recibir créditos por reducciones de emisiones conseguidas cooperativamente (a través de proyectos) en otros países del Anexo I.

3. El *mecanismo para un desarrollo limpio (clean development mechanism)*: también permite a las Partes del Anexo I recibir créditos por reducciones de emisiones conseguidas cooperativamente, pero esta vez en países en desarrollo.

En la COP 21, celebrada en diciembre de 2015, se firmó el Acuerdo de París, que se aplicará tras el vencimiento de la prórroga del Protocolo de Kioto, es decir, a partir del día 1 de enero de 2021. El artículo 2.1 del Acuerdo establece como objetivos:

- a) Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático;
- b) Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, de un modo que no comprometa la producción de alimentos;
- c) Elevar las corrientes financieras a un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. (Naciones Unidas, 2015, p. 24).

Para conseguir el primer objetivo, los países signatarios están de acuerdo en la necesidad de que las emisiones globales dejen de aumentar cuanto antes y que a partir de ese momento se reduzcan lo más rápido que sea posible. No obstante, se reconoce que esto llevará más tiempo a los países en vías de desarrollo. Todos los países deberán enviar sus "contribuciones determinadas a nivel nacional" (CDNN), que deben ser ambiciosas y progresar en el tiempo. Las CDNN deben reportarse cada cinco años. La UE ya ha reportado su primera CDNN; en marzo de 2015, antes de la firma del Acuerdo, la UE se comprometió a reducir sus emisiones en al menos un 40% en 2030. El problema de las CDNN y, por ende, del Acuerdo de París, es que no son vinculantes en términos de derecho internacional y no existe ningún mecanismo para hacerlas cumplir.

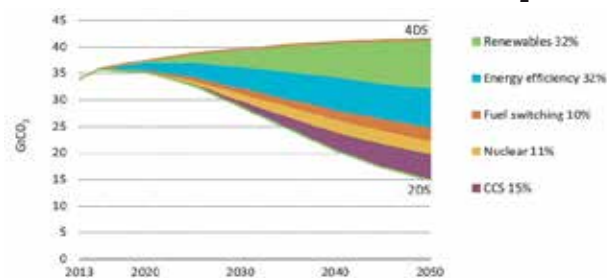
Otro aspecto importante de la CMCC es la adopción del Fondo Verde para el Clima como mecanismo financiero de la Convención para contribuir a alcanzar los objetivos de adaptación y mitigación del cambio climático, decisión tomada en la COP 16 en 2011. Aunque no se trate de un compromiso del Acuerdo de París, los países desarrollados tienen la intención de movilizar 100.000 mill. de dólares por año en 2020 y ampliar esta cantidad hasta 2025 para reducir las emisiones en los países en desarrollo y contribuir a su resiliencia a los impactos del cambio climático.

4.3 Análisis económico y políticas públicas

El análisis económico del problema sugiere la conveniencia de una actuación más decisiva que la que se deriva de la respuesta internacional que hoy observamos. La principal conclusión del Informe Stern (Stern, 2006) es que los beneficios de actuar temprana y contundentemente contra el cambio climático superan considerablemente los costes de dicha actuación. El Informe concluía originalmente que se requerían inversiones anuales del 1% del PIB mundial para evitar los peores efectos del cambio climático, y que no llevarlas a cabo podía suponer que el PIB mundial fuera hasta un 20% inferior que si se acometieran dichas inversiones. Dos años después del informe original, Stern (2008) aumentó su estimación de las inversiones necesarias al 2% del PIB, dado que las nuevas predicciones anticipaban un cambio climático más rápido.

Por tanto, necesitamos un cambio radical en la forma en la que producimos y usamos energía, que resulte en un modelo energético sostenible. Los escenarios contemplados tanto por el Grupo de Expertos Intergubernamental sobre Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC, 2014) como por la Agencia Internacional de la Energía (AIE, 2016) encuentran cinco opciones principales de mitigación del cambio climático: la eficiencia energética, que es la más importante a corto plazo, pues existen múltiples oportunidades de aumentarla con coste negativo; las energías renovables, que en la mayoría de escenarios constituyen la principal fuente de reducción de emisiones a largo plazo; las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, que permitirían seguir utilizando combustibles fósiles sin emitir CO₂, pero sobre las que todavía existen múltiples incertidumbres sobre su viabilidad y costes; la energía nuclear, con sus propios y evidentes problemas, que ponen en duda el aumento futuro de su papel; y la sustitución de combustibles más contaminantes por otros menos contaminantes, como el carbón por el gas natural. El Gráfico 3 muestra la importancia relativa de estas cinco opciones para reducir las emisiones de CO₂ hasta 2050, de acuerdo con las estimaciones de la AIE.

Gráfico 3: Contribución de cada opción tecnológica a la reducción global acumulativa de emisiones de CO₂



Fuente: AIE, 2016.

La transición a un modelo energético sostenible requiere que las políticas públicas creen una notable certeza a largo plazo sobre la demanda futura de tecnologías bajas en carbono, lo que permitiría su desarrollo a tiempo para lograr escenarios compatibles con un aumento de temperaturas no superior a 2 °C, que es el objetivo asumido internacionalmente para evitar los peores efectos del cambio climático. Para que dichas políticas sean eficientes, es decir, para que la reducción de las emisiones de GEI se produzca al mínimo coste, el análisis económico demuestra que deben basarse prioritariamente en instrumentos económicos (fundamentalmente, impuestos sobre emisiones y permisos de emisión negociables). La ventaja esencial de los instrumentos económicos es que permiten minimizar los costes totales de disminuir las emisiones, al hacer que se igualen los costes marginales de reducir dichas emisiones entre las distintas fuentes de emisión. Además de esta virtud de eficiencia estática, los instrumentos económicos son también eficientes de manera dinámica; los impuestos sobre las emisiones y los permisos de emisión negociables proporcionan los mayores incentivos para el desarrollo de tecnologías que permitan reducir las emisiones de GEI a un menor coste.

La necesidad de minimizar los costes de disminuir las emisiones de GEIs se manifiesta en el propio Protocolo de Kioto, que prevé el uso de los *mecanismos de flexibilidad*. También para satisfacer esa necesidad, la UE estableció el Régimen Europeo de Comercio de Derechos de Emisión, al que desde 2005 están sometidos los grandes emisores de CO₂. Los precios de este mercado deberían proporcionar la señal inequívoca a los agentes económicos que conduzca a la necesaria inversión en tecnologías reductoras de las emisiones, pero su nivel actual es demasiado bajo para garantizar un despliegue masivo de las tecnologías mencionadas anteriormente.

Aunque la UE ha optado por los permisos de emisión como principal instrumento económico en materia de cambio climático, sus propuestas impositivas para reducir las emisiones de GEI tienen décadas y muchos países europeos han introducido impuestos medioambientales con este fin. Una ventaja del uso de instrumentos fiscales es que pueden ser la base para una *reforma fiscal ecológica*, capaz de proporcionar un “doble dividendo” (Goulder, 1995): el beneficio ambiental como primer dividendo y una reducción de las distorsiones introducidas en la economía por el sistema fiscal como segundo dividendo. Se trata de usar los ingresos proporcionados por los tributos medioambientales para reducir otros tributos ya existentes que generen grandes distorsiones en la economía y, por ello, pérdidas de bienestar, como los que gravan el trabajo, los beneficios o el ahorro, así como las contribuciones a la seguridad social. El uso de los permisos de emisión para los sectores con unidades emisoras grandes y localizadas y los impuestos para los sectores “difusos” (residencial, agrícola, transporte), cuyas emisiones son más difíciles de controlar, resulta una

combinación adecuada de instrumentos económicos que permitiría reducir los costes de la radical reducción de emisiones de GEI que debemos acometer a lo largo de este siglo.

España no se encuentra entre los países que han emprendido reformas fiscales ecológicas. Como consecuencia, la fiscalidad no juega un papel muy relevante en la política española contra el cambio climático. La excepción la constituye la reforma del Impuesto Especial sobre Determinados Medios de Transporte (IEDMT, habitualmente denominado impuesto de matriculación) que entró en vigor en enero de 2008, que hizo que el gravamen dependiera de las emisiones potenciales de CO₂ de cada vehículo. El resultado ha sido un progresivo cambio en el parque automovilístico español hacia vehículos que emiten menos CO₂; un claro ejemplo de la efectividad del uso de instrumentos fiscales en la política medioambiental.

Sin embargo, existe todavía un gran potencial de utilización de las herramientas fiscales en el sector del transporte que no se está utilizando en España. En particular, Buñuel (2009) propone el uso del Impuesto Especial sobre Hidrocarburos (IEH) como instrumento fiscal al servicio de la política de medio ambiente, así como la eliminación gradual del IEDMT y la progresiva sustitución de su recaudación por la de un nuevo Impuesto sobre las Emisiones de los Vehículos de Motor (IEVM), que reemplazaría al Impuesto sobre Vehículos de Tracción Mecánica (IVTM, habitualmente denominado impuesto de circulación). Su propuesta es que la desaparición del IEDMT se produzca de forma paulatina a lo largo de un periodo transitorio de 10 años, para evitar las distorsiones en el mercado de vehículos que generaría una desaparición súbita o rápida, así como la falta de equidad que esto supondría para quienes adquirieran un vehículo antes de la desaparición del IEDMT y se vieran luego obligados a pagar un IEVM mucho más elevado que el IVTM para compensar la pérdida de recaudación cuando desapareciera el IEDMT. La recaudación perdida por este impuesto se compensaría al 50 por ciento con un aumento del IVTM, que se transformaría en el IEVM, y en el otro 50 por ciento por un aumento del IEH.

Pese a la relevancia que podrían tener los tributos que acabamos de mencionar, el más adecuado frente al cambio climático es otro: un impuesto sobre el carbono, pues proporciona los incentivos precisos para promover el ahorro energético, la sustitución de los combustibles fósiles de mayor contenido en carbono por los de menor contenido, y la sustitución de los combustibles fósiles por fuentes alternativas de energía (principalmente, energías renovables). Un impuesto sobre el carbono es equivalente a un impuesto sobre los combustibles fósiles cuyos tipos impositivos dependan del contenido en carbono de cada combustible. Considerando que la relación entre las emisiones de CO₂ y el contenido de carbono de cada combustible fósil es prácticamente proporcional, un impuesto sobre el carbono equivale a un impuesto sobre las emisiones

de CO₂. Buñuel (2011) ha propuesto su introducción en España con las siguientes características:

1. El consumo por los sectores más intensivos en el uso de la energía y expuestos a la competencia internacional quedaría exento, de forma que estos sectores quedaran sometidos exclusivamente al sistema europeo del comercio de derechos de emisión.
2. La base imponible sería el peso del carbono contenido en el combustible.
3. El tipo impositivo ascendería inicialmente a sólo 5 euros por tonelada de CO₂ y se iría incrementando en 2 euros cada año, hasta alcanzar 25 euros por tonelada al cabo de 10 años. Esta propuesta de mínimos conseguiría generar señales adecuadas de precio a la vez que reducir los posibles costes económicos mediante la introducción progresiva del impuesto.

Buñuel (2011) simula el efecto sobre los precios sectoriales del impuesto sobre el carbono propuesto, concluyendo que, más allá del efecto directo sobre el precio de los combustibles, no se producirían grandes efectos inflacionistas, salvo para el sector de producción y distribución de energía eléctrica. Sin embargo, este efecto se vería contrarrestado si las primas a las energías renovables dejaran de ser un coste del sistema eléctrico, como también propone. Teniendo en cuenta que estas primas suponen hoy en día un porcentaje del total de los costes eléctricos mayor que el máximo aumento de precios que estimado por Buñuel, el resultado conjunto del impuesto y de trasladar las primas a los Presupuestos Generales del Estado reduciría los precios de la electricidad.

El uso de instrumentos económicos frente al cambio climático no se agota con los impuestos sobre el consumo de energía o las emisiones, y con los sistemas de permisos de emisión negociables. También deben considerarse las subvenciones, tanto su introducción para fomentar la eficiencia energética y las energías renovables como la eliminación de las subvenciones nocivas para el medio ambiente. En el caso de España, las subvenciones en forma de primas a las energías renovables (*feed-in tariffs*) han jugado un papel muy importante en su desarrollo. Sin embargo, su diseño no fue bien concebido, y dio lugar a una verdadera "burbuja" en el sector renovable, especialmente en el fotovoltaico, que trató de corregirse con posteriores y sucesivos recortes de las primas. Con respecto a las subvenciones nocivas para el medio ambiente, resulta urgente en España que se acabe con las subvenciones al carbón, que han supuesto y todavía suponen un desperdicio de ingentes recursos económicos, que favorecen las emisiones de CO₂, al apoyar la quema de carbón en centrales térmicas de producción eléctrica.

Las subvenciones públicas son especialmente adecuadas y necesarias para promover proyectos pioneros de I+D+i, que a su vez tienen una gran capacidad de generar efectos colaterales positivos para nuevos proyectos e inversiones (Dechezleprêtre et al. 2016). De acuerdo con Acemoglu et al. (2016), las subvenciones pueden ser mucho más importantes que los impuestos sobre el carbono, aunque creemos que se trata de instrumentos complementarios. Los impuestos sobre el carbono (y los permisos de emisión negociables) deben hacer que el coste social del carbono, descrito en la sección 3, sea interiorizado en los precios, lo que haría innecesarias muchas subvenciones. Pero las subvenciones seguirán siendo esenciales para apoyar los proyectos de I+D+i antes citados y para que las tecnologías inmaduras puedan reducir sus costes a través de la curva de aprendizaje. El volumen relativo de la subvención ha de estar directamente vinculado al potencial impacto del proyecto en materia de reducción de emisiones y a la capacidad de generar conocimiento público que pueda ser utilizado en otros proyectos. Si no dispusiesen de subvenciones públicas, el mercado no generaría inversiones de este tipo suficientes para las necesidades de la sociedad, ya que al ser proyectos con muy alto riesgo, el coste de capital al que se descuentan los flujos esperados es muy alto.

5. CONCLUSIONES

El trabajo se ha centrado en realizar una revisión general del problema del cambio climático y las políticas para enfrentarse a él. Aunque todavía quedan algunos negacionistas, actualmente hay un acuerdo generalizado acerca de que la actividad económica de la humanidad ha generado una dinámica de incremento de las temperaturas, tanto en la atmósfera como en los océanos, como consecuencia de la acumulación de GEI en la atmósfera. El aumento de la temperatura provoca un aumento del nivel del mar, una mayor frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos y un aumento de los procesos de desertificación. Todo ello conlleva, a su vez, un daño al entorno económico, social y cultural de la propia humanidad.

La valoración de los daños y el impacto de las políticas para minorar dichos daños es un asunto muy difícil de modelar con precisión. El muy elevado grado de incertidumbre y la falta de experiencia empírica dificultan la cuantificación de las relaciones entre variables. Por otro lado la valoración al momento actual de unos daños, algunos de los cuales se producirán en un horizonte de cientos de años, requiere la utilización de una tasa de descuento en la que se valoren convenientemente los daños de generaciones futuras. Para ello, dicha tasa ha de ser muy reducida si deseamos mantener un principio de solidaridad o de justicia intergeneracional.

La esencia de la lucha se centra en contener y limitar la concentración en la atmósfera de GEI, para lo cual es esencial reducir las emisiones antropogénicas, en especial el CO₂. Hay tres tipos de políticas para abordar el problema del cambio climático: una política de adopción de contramedidas para contrarrestar el aumento de las temperaturas, una política de adaptación y una política de prevención o mitigación de las causas que generan el problema. Otro gran consenso generalizado es que, hoy en día, las únicas políticas razonables son la adaptación y la mitigación. Las técnicas de geoingeniería basadas en la manipulación del clima presentan serias críticas desde el punto de vista ético.

Estamos en total sintonía con la principal conclusión del Informe Stern de 2006, cuando indica que los beneficios de actuar temprana y contundentemente contra el cambio climático superan considerablemente los costes de dicha actuación. En este sentido, resulta fundamental proceder a un cambio radical en la forma en la que producimos y usamos energía, de tal manera que se adopte por todos los países un modelo energético sostenible. La transición a un modelo de este tipo requiere que las políticas públicas creen una notable certeza a largo plazo sobre la demanda futura de tecnologías bajas en carbono. Para que dichas políticas sean eficientes, es decir, para que la reducción de las emisiones de GEI se produzca al mínimo coste, el análisis económico demuestra que deben basarse prioritariamente en instrumentos económicos, tales como impuestos sobre emisiones y permisos de emisión negociables. También hay que tener presente la conveniencia de subvenciones públicas a proyectos de I+D pioneros y con efectos colaterales positivos sobre nueva investigaciones y proyectos de mejora.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acemoglu, D., Akcigit, U., Hanley, D. y Kerr, W. (2016): "Transition to Clean Technology", *Journal of Political Economy*, 2016, vol. 124, no. 1.
- AIE (2016): *Energy Technology Perspectives 2016 - Towards Sustainable Urban Energy Systems*, París: International Energy Agency.
- BAMS (Bulletin of the American Meteorological Society) (2016): *State of the Climate in 2015*. 97 (8). (<https://www.ncdc.noaa.gov/bams>).
- BP (2016): BP Statistical Review of World Energy 2016.
- Buñuel, Miguel (1999): *El uso de instrumentos económicos en la política del medio ambiente*, Colección Estudios 75, Madrid: Consejo Económico y Social.
- Buñuel, Miguel (2009): "Capítulo II: Análisis del uso de instrumentos fiscales en la lucha contra el cambio climático: el caso de la fiscalidad de los vehículos de motor en España", en Iñaki Bilbao Estrada, Francisco A. García Prats and

- Alberto Cornejo Pérez (coordinadores), *La fiscalidad de los derechos de emisión: estado de situación y perspectivas de futuro*, Madrid: Instituto de Estudios Fiscales, pp. 37-93.
- Buñuel, Miguel (2011): "El precio de la electricidad y la política de cambio climático: ¿Qué papel puede jugar un impuesto sobre el carbono en España?", *Estudios de Economía Aplicada* 29(2).
- Callendar, G.S. (1939): "The composition of the atmosphere through the ages". *Meteorological Magazine* Vol. 74. No 878.
- Church, J. A. y White, N.J. (2006): "A 20th century acceleration in global sea level rise", *Geophysical Research Letters*, 33.
- Climate Emergency Institute (2016): *Global warming has not stopped WMO 2013 on Temperature*, Disponible en (<http://www.climateemergencyinstitute.com/wmoontemperature.html>)
- Comisión Europea (2016): *Causes of climate change*. Disponible en: http://ec.europa.eu/clima/change/causes/index_en.htm
- Consejo de las Comunidades Europeas (2002): *Decisión del Consejo, de 25 de abril de 2002, relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y al cumplimiento conjunto de los compromisos contraídos con arreglo al mismo, 2002/358/EC*.
- Corner, A. y Pidgeon, N. (2010): "Geoengineering the Climate: The Social and Ethical Implications", *Environment Magazine*, enero-febrero, volume 52-1.
- CSIRO (2016): *Sea-level rise observations, projections and causes*, Disponible en: <http://www.csiro.au/en/Research/Environment/Oceans-and-coasts/Sea-level-rise>
- Dechezleprêtre, A., Martin, R. y Bassi, S. (2016): *Climate change policy, innovation and growth*, Gratham Research Institute on Climate Change and the Environment, London School of Economics, Policy Brief, January.
- Derksen, C. y Brown, R. (2012): "Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections", *Geophysical Research Letters*, 39:L19504
- Fischer, E. M. y Knutti, R. (2015): "Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes". *Nature Climate Change*, 5(6), 560–564.
- Dilling, L. y Hauser, R. (2013): "Governing geoengineering research: why, when and how?", *Climate Change*, vol.121, diciembre-3.
- El País (2016): *La formación de lagos azules en la Antártida alarma a los científicos*. http://elpais.com/elpais/2016/08/22/ciencia/1471879655_591528.html.

- Fischer, E. M. y Knutti, R. (2015): "Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes". *Nature Climate Change*, 5(6), 560–564.
- FitzRoy, F. R., y Papyrakis, E. (2016): *An introduction to climate change economics and policy*. Routledge.
- Forrester, J.W. (1961): *Industrial dynamics*. The MIT Press. Cambridge.
- GISTEMP Team. (2016): *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*, NASA Goddard Institute for Space Studies. (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>).
- Gore, A. (2007): *Una verdad incómoda: la crisis planetaria del calentamiento global y cómo afrontarla*. Gedisa.
- Goulder, Larry H. (1995): "Environmental Taxation and the Double Dividend: A Reader's Guide," *International Tax and Public Finance* 2, pp. 157-184.
- Hansen, J. (2007): "Special Report Earth", *New Scientist*, 25 July.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. y Lo, K. (2010): "Global surface temperature change", *Rev. Geophys.*, 48.
- Hernández, P.J. (2016). "Permítame que insista: 77 años de advertencias sobre el cambio climático". Naukas. <http://naukas.com/2016/06/23/permiteme-insista-77-anos-advertencias-cambio-climatico/>
- Heal, G. (2009): "Climate Economics: A Meta-Review and Some Suggestions for Future Research", *Review of Environmental Economics and Policy*, volume 3, issue 1, winter.
- High Meadows Institute, (2015): *Charting the Future for Capital Markets. A survey of current non-regulatory industry and multi-stakeholder initiatives*.
- Hope, C. (2006): "The Marginal Impact of CO2 from PAGE 2002", *Integrated Assessment Journal* 6 (1): 9-56.
- Howard, P. y Sylvan, D. (2015): *Expert Consensus on the Economics of Climate Change*, Institute for Policy Integrity, New York University School of Law.
- Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, United States Government (2010): *Technical Support Document: - Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis – Under Executive Order 12866*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007): *Climate Change 2007: Synthesis report Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Summary for Policymakers. A Report of Working Group 1 of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Third Assessment Report. Available at <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC (2014): *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of

- Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Langley, E. S, Leeson, A.A. Stokes, C.R. y Jamieson, S.S.R. (2016): "Seasonal evolution of supraglacial lakes on an East Antarctic outlet glacier", *Geophys. Res. Lett.*, 43.
- Levitus, et al. (2009): "Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems", *Geophys. Res. Lett.*, 36.
- Manabe, S. y Wetherald, R. T. (1967): "Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity". *J. Atmos. Sci.* 24:241-59.
- Mathiesen, K. (2015): *England faces major rise in record hot years due to climate change – scientists*, The Guardian, 1 de mayo.
- Naciones Unidas (1998): *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, FCCC/INFORMAL/83*.
- Naciones Unidas, Convención Marco sobre el Cambio Climático (2015): *Aprobación del Acuerdo de París*, FCCC/CP/2015/L.9, París: 12 de diciembre.
- NASA (2016): *Climate change: How do we know?* **Disponible en:** <http://climate.nasa.gov/evidence>
- Nordhaus W.D. (1993): "Rolling the "DICE": an optimal transition path for controlling greenhouse gases", *Resource and Energy Economics*, 15.
- Nordhaus, W.D. (2008): *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*. New Haven and London: Yale University Press.
- NSDIC (National Snow and Ice Data Center) (2016): *State of the Cryosphere*. Disponible en http://nsidc.org/cryosphere/sotc/glacier_balance.html
- Osborn, T.J. y Jones, P.D. (2014): "The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: construction, previous versions and dissemination via Google Earth", *Earth System Science Data* 6, 61-69 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>)
- Petit, J.R., I. Basile, A. Leruyet, D. Raynaud, C. Lorius, J. Jouzel, M. Stievenard, V.Y. Lipenkov, N.I. Barkov, B.B. Kudryashov, M. Davis, E. Saltzman, and V. Kotlyakov. (1997): "Four climate cycles in Vostok ice core", *Nature* 387: 359-360.
- Pindyck, R. S. (2013): "Climate change policy: What do the models tell us?", *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860–872.
- Polyak, L. et al. (2009): "History of Sea Ice in the Arctic". En *Past Climate Variability and Change in the Arctic and at High Latitudes*. U.S. Geological Survey, Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 1.2, chapter 7.

- Sabine, C.L. et al. (2004): "The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂" *Science* 305: 367-371.
- Schneider, S. H. (1989): "The Greenhouse Effect: Science and Policy," *Science* 243.
- Stern, N. (2006): *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. London: H. M. Treasury.
- Stern, Nicholas. 2008. "The Economics of Climate Change." *American Economic Review* 98 (2): 1–37.
- The New York Times (2015): *The Risks of Climate Engineering*, 12 de febrero.
- The Royal Society (2009): *Geoengineering the climate Science, governance and uncertainty*.
- US Environmental Protection Agency (US-EPA) (2015): *Social Cost of Carbon*, EPA Fact Sheet. Disponible en <https://www3.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/social-cost-carbon.pdf>
- Task Force on Climate-Related Financial Disclosures (TCFD) (2016): *Phase I Report of The Task Force on Climate-Related Financial Disclosures*, Financial Stability Board, marzo.
- Tol, R. S. J. (2002_a): "Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part I: Benchmark Estimates", *Environmental and Resource Economics*, 21-1, January.
- Tol, R. S. J. (2002_b): "Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part II: Dynamic Estimates", *Environmental and Resource Economics*, 21-2, February.
- Weitzman, M. (1998): "Why the far distant future should be discounted at the lowest rate", *Journal of Environmental Economics and Management* 36:201–8.
- World Economic Forum (2016): *The Global Risk Report 2016*, 11ª edición, Ginebra.
- World Bank (2006): *World Bank Open Data*, Disponible en <http://data.worldbank.org/>